

УДК 669.3:539.89:539.25

**Д. Н. Абдуллина<sup>1\*</sup>, И. В. Хомская<sup>1</sup>, С. В. Разоренов<sup>2</sup>, Е. В. Шорохов<sup>3</sup>,  
Г. В. Гаркушин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

<sup>2</sup> Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка

<sup>3</sup> РФЯЦ-ВНИИ технической физики им. акад. Е. И. Забабахина, г. Снежинск

\*abdullina@imp.uran.ru

Научный руководитель — д-р техн. наук И. В. Хомская

## ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МЕДИ И СПЛАВОВ МЕДИ, ПОЛУЧЕННЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ПРЕССОВАНИЕМ

Исследованы механические свойства меди чистотой 99,8 мас. % и сплавов Cu–0,03 мас. %Zr и Cu–0,1 мас. %Cr с субмикрокристаллической структурой, полученной методом динамического канально-углового прессования. Испытания проводились в условиях ударного сжатия с давлением до 7 ГПа и скоростью деформации  $10^5 \text{ с}^{-1}$ .

*Ключевые слова:* медь и медные сплавы, субмикрокристаллическая структура, откольная прочность, динамический предел упругости

**D. N. Abdullina, I. V. Khomskaya, S. V. Razorenov, E. V. Shorokhov, G. V. Garkushin**

## DYNAMIC STRENGTH OF SUBMICROCRYSTALLINE COPPER AND COPPER ALLOYS OBTAINED BY HIGH-SPEED PRESSING

The mechanical properties of copper with a purity of 99,8 wt. % and alloys Cu–0,03 wt. %Zr and Cu–0,1wt. %Cr with submicrocrystalline structure obtained by dynamic channel-angular pressing was studied. The tests were carried out under shock-wave compression with pressure up to 7 GPa and strain rate  $10^5 \text{ s}^{-1}$ .

*Key words:* copper and copper alloys, submicrocrystalline structure, spall strength, dynamic elastic limit

**И**зучено влияние дисперсности кристаллической структуры меди и сплавов Cu–0,03 мас. %Zr и Cu–0,1 мас. %Cr, полученной ме-

тодом динамического канально-углового прессования (ДКУП), на динамические свойства. Метод ДКУП представляет собой высокоскоростной ( $10^4$ – $10^5$  с $^{-1}$ ) вариант квазистатического РКУП [1]. При ДКУП на результирующую структуру материала оказывают влияние высокоскоростная деформация простого сдвига, ударно-волновая деформация сжатия и температура. Преобразование исходной крупнокристаллической (КК) структуры в субмикроструктурную (СМК) и нанокристаллическую (НК) в меди происходит в результате циклических процессов фрагментации и динамической рекристаллизации [2]. В сплавах меди СМК структура формируется за счет фрагментации и частичного деформационного старения с выделением наноразмерных частиц Cr и Cu<sub>5</sub>Zr.

Проведен анализ эволюции структуры и механических свойств динамического предела упругости ( $\sigma_{HEL}$ ), динамического предела текучести ( $Y$ ) и динамической (откольной) прочности ( $\sigma_{sp}$ ) меди и ее сплавов до и после ДКУП по различным режимам, который позволил оценить влияние дисперсности и дефектности кристаллической структуры на ее сопротивление высокоскоростному деформированию и разрушению. Ударно-волновые эксперименты проводили в специальной взрывной камере [3], при этом давление составило 5,6–7,0 ГПа, скорость деформации в разгрузочной части волны сжатия перед откольным разрушением —  $(0,9$ – $2,0) \cdot 10^5$  с $^{-1}$ . В процессе нагружения осуществлялась непрерывная регистрация профилей скорости свободной поверхности при помощи лазерного Доплеровского измерителя скорости VISAR, имеющего временное разрешение  $\sim 1$  нс [3]. На основании анализа полученных волновых профилей (рис.) были определены параметры нагружения (давление ударного сжатия, скорость свободной поверхности на фронте упругого предвестника, максимальная скорость свободной поверхности) и рассчитаны по формулам, приведенным в [3], динамические свойства анализируемых материалов. Из сравнения волновых профилей (рис.) и данных, приведенных в таблице, видно, что измельчение исходной КК структуры меди и сплавов (кривые 1) до СМК (МК) и СМК+НК (СМК) состояний (кривые 2 и 3) приводит к существенному изменению свойств.

В частности, измельчение зерна меди от 100 до 0,5 и 0,05–0,40 мкм при ДКУП  $n = 1$  и  $n = 4$  соответственно, увеличивает  $\sigma_{HEL}$  и  $Y$  в 6 раз.

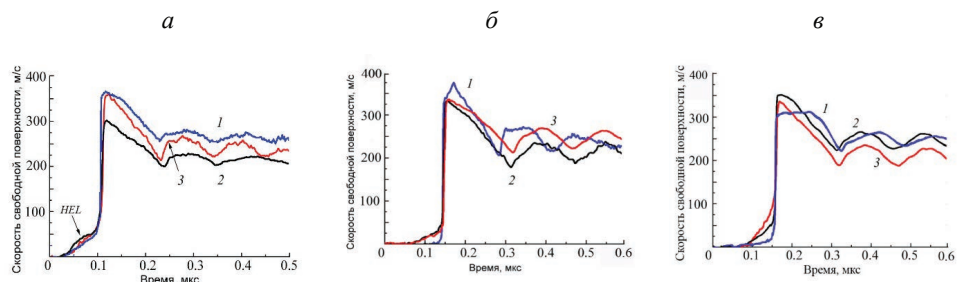


Рис. Волновые профили образцов меди (а) и сплавов Cu–0.03 мас. %Zr (б) и Cu–0,1 мас. %Cr (в):

1 — исх. КК состояние; 2 — ДКУП,  $n = 1$ ; 3 — ДКУП,  $n = 3-4$

Рост  $\sigma_{HEL}$  обусловлен специфической неравновесной структурой, сформированной при ДКУП, характеризующейся наличием большого числа микродефектов, которые препятствуют движению дислокаций [3]. Увеличение  $Y$  СМК и СМК+НК меди показывает, что упрочняющий эффект ДКУП сохраняется при скорости деформирования, соответствующей условиям ударного сжатия. При измельчении до СМК+НК состояния  $\sigma_{sp}$  меди увеличивается в 1,4 раза, что связано с образованием структуры, состоящей из сильно разориентированных зерен размерами 0,05–0,40 мкм со значительной долей высокоугловых границ, что способствует затруднению роста микротрещин и может быть причиной увеличения откольной прочности.

Таблица

Характеристики динамической прочности меди и сплавов

Материал	Структура, размер зерна, обработка	$\sigma_{HEL}$ , ГПа	$Y$ , ГПа	$\sigma_{sp}$ , ГПа
99,8 %Cu	КК 100 мкм (отжиг 450 °C)	<0,10	<0,05	1,86
	СМК 0.5 мкм (ДКУП, $n = 1$ )	0,62	0,30	1,79
	СМК+НК 0.05–0.40 (ДКУП, $n = 4$ )	0,69	0,30	2,51
Cu-0,03 %Zr	КК 200–400 мкм (закалка 1000 °C)	0,22	0,11	3,22
	МК 1–5 мкм (ДКУП, $n = 1$ )	0,41	0,18	2,90
	СМК 0.2–0.4 (ДКУП, $n = 3$ )	0,42	0,20	2,31
Cu-0,1 %Cr	КК 200–400 мкм (закалка 1000 °C)	0,19	0,12	1,90
	МК 1–5 мкм (ДКУП, $n = 1$ )	0,54	0,21	2,40
	СМК 0,2–0,4 (ДКУП, $n = 3$ )	0,70	0,31	2,76

Определено, что ДКУП сплавов  $\text{Cu}-0,03 \text{ мас. \%Zr}$  и  $\text{Cu}-0,1 \text{ мас. \%Cr}$ , приводящее к измельчению кристаллитов от 200–400 до 1–5 (0,2–0,4) мкм увеличивает  $\sigma_{HEL}$  и  $Y$  в 1,9–4,0 раза по сравнению с исходным КК состоянием. Диспергирование структуры сплава  $\text{Cu}-0,1 \text{ \%Cr}$  до СМК состояния в 1,5 раза увеличивает откольную прочность по сравнению с исходным КК состоянием. Повышенный уровень динамических свойств сплавов, по сравнению с медью, связан с дополнительным упрочнением, обусловленным выделением наночастиц Cr и  $\text{Cu}_5\text{Zr}$  на границах и внутри зерен в процессе ДКУП.

*Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Структура» № АААА-А18-118020190116-6 и Программе Президиума РАН «Конденсированное вещество и плазма при высоких плотностях энергии».*

### Литература

1. Способ динамической обработки материалов : пат. 2283717 Рос. Федерация: МПК 51 В 21 J 5/04, В 21 С 23/18, С 21 D 7/02 / Шорохов Е. В., Жиглев И. Н., Валиев Р. З.; заявитель и патентообладатель РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина № 2004131484/02; заявл. 28.10.04; опубл. 27.04.06. Бюл. № 26. 64 с.
2. Исследование структуры и свойств субмикроструктурной и нанокристаллической меди, полученной высокоскоростным прессованием / И. В. Хомская [и др.] // ФММ. 2011. Т. 111, № 6. С. 639–650.
3. Разоренов С. В., Гаркушин Г. В. Упрочнение металлов и сплавов при ударном сжатии // ЖТФ. 2015. Т. 85, № 7. С. 77–82.